

5. Притцкеровская премия 2021: Почему Lacaton & Vassal?  
URL: <https://design-mate.ru/read/pritzker-prize-lacaton-vassal-2021> (дата обращения: 28.03.2021)

6. Karim Rashid [сайт]. URL: <http://www.karimrashid.com> (дата обращения: 28.03.2021)

УДК: 620.91

**Щеклеин Сергей Евгеньевич**

профессор, д.т.н.

зав. кафедрой «Атомные станции и возобновляемые  
источники энергии»

Заслуженный энергетик РФ

Уральский федеральный университет им.

первого Президента России Б. Н. Ельцина

г. Екатеринбург

## **ЭНЕРГЕТИКА 21-ГО ВЕКА**

*Аннотация. Взрывной рост населения планеты, радикальное повышение стандартов энергообеспечения имеют следствием резкое повышение объемов потребления энергоресурсов и антропогенной нагрузки на окружающую среду и климат. Естественно, что развивающиеся страны используют в первую очередь энергоисточники, имеющие наибольший уровень EROEI, т.к. это позволяет достичь энергетического благополучия в кратчайшие сроки и обеспечивает качество жизни современных поколений. Из известных технологий надежного и экологически безопасного производства энергии на сегодняшний день в лидеры уверенно выходит атомная энергетика. Набирается положительный опыт использования всех типов возобновляемых источников энергии. В тоже время использование основного загрязнителя биосферы—органического топлива составляет в мире более 90% и не имеет реалистичных тенденций к снижению в ближайшие десятилетия. Быстро развивающиеся экономики Китая, Индии, стран Латинской Америки и Африканского континента, где проживает большая часть населения планеты, не могут быть ограничены в развитии вследствие равенства людей пе-*

*ред богом в угоду странам уже имеющим высокий уровень промышленности и энергетики. Насущным требованием сегодняшнего дня является создание технологий сберегающих ограниченные ресурсы природных топлив (газ, уголь, уран и пр.), максимально снижающих антропогенную нагрузку на биосферу и повышающих эффективность использования энергии у потребителей.*

*В данной работе рассматривается возможный вариант совместного использования всех видов доступных на сегодняшний день энергетических технологий для создания надежной энергетики и достижения синергетического эффекта в снижении экологической нагрузки и минимизации потребления топлив. Показано, что создание атомно-теплоэнергетических станций, дополненных пиковыми солнечно-ветровыми источниками позволяет реально снизить удельные расходы ядерного и органического топлива на 25-30%, объемы потребления водных ресурсов 1,5 раза, антропогенные газовые выбросы в атмосферу в 2,5 раза.*

*Ключевые слова: атомная энергетика, тепловая энергетика, возобновляемая энергетика, экология, надежность энергообеспечения, водные ресурсы.*

**Shcheklein S.E.**

## **THE ROLE OF ENERGY IN OVERCOMING DEMOGRAPHIC AND CLIMATE THREATS**

*Abstract. The explosive growth of the world's population, the radical increase in energy supply standards have resulted in a sharp increase in the volume of energy consumption and anthropogenic pressure on the environment and climate. Naturally, developing countries primarily use energy sources that have the highest level of EROEI, because this allows us to achieve energy well-being in the shortest possible time and ensures the quality of life of modern generations. Among the well-known technologies of reliable and environmentally safe energy production, nuclear power is now confidently becoming the leader. We are gaining positive experience in using all types of renewable energy sources. At the same time, the use of the main pollutant of the biosphere— organic fuel in the world is more*

**Щеклеин С. Е.**

than 90% and has no realistic trends to decrease in the coming decades. The rapidly developing economies of China, India, Latin America and the African continent, where most of the world's population lives, cannot be restricted in development due to the equality of people before God in favor of countries that already have a high level of industry and energy. The urgent requirement of today is the creation of technologies that save the limited

Keywords: nuclear power, thermal power, renewable energy, ecology, reliability of energy supply, water resources.

### Введение

Взрывной рост населения планеты, связанный с повышением стандартов жизнеобеспечения, развитием медицины, сельского хозяйства, биологии и других наук иллюстрирует рис.1. [1].

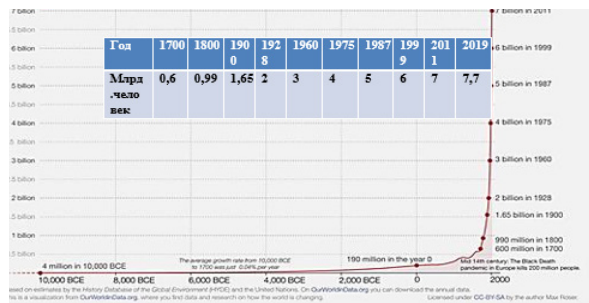


Рис.1. Рост численности населения планеты

Потребление первичных энергетических ресурсов странами мира в последние десятилетия 20 и в начале 21 веков иллюстрирует рис.2. [2].

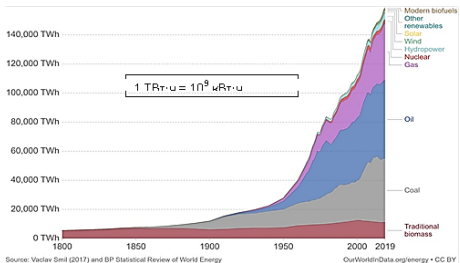


Рис.2. Мировое потребление первичных энергетических ресурсов

Щеклеин С. Е.

Известно, что рост мирового энергопотребления происходит в мире за счет развивающихся стран- Китая, Индии, стран Латинской Америки и Африканского континента, где проживает большая часть населения планеты [3].

Такие темпы изменений в энергообеспечении неизбежно приводят к росту антропогенного воздействия на биосферу планеты, в т.ч. развитию парникового эффекта. На рис. 3. Приведены данные по воздействию на биосферу современных энергетических технологий при производстве электрической энергии [4].

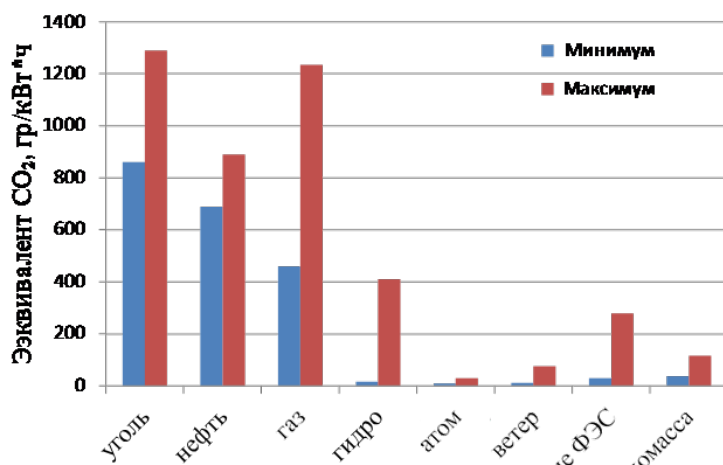


Рис.3. Эмиссия эквивалента CO<sub>2</sub> при производстве электрической энергии

Следует отметить, что парниковый эффект создают не только газовые продукты, возникающие при сжигании органических топлив, но и пары воды, поступающие в атмосферу в составе продуктов сгорания и в процессе охлаждения конденсаторов электростанций градирнями и прудами охладителями.

Данный эффект имеет место для всех типов электростанций, работающих по любому термодинамическому циклу (Ренкина, Брайтона и пр.).

В таблице 1 приведены показатели парникового эквивалента CO<sub>2</sub> для ряда газов [5], в т.ч. продуктов горения топлив и испарения воды в системах технического водоснабжения.

Газ	Парниковый эквивалент CO <sub>2</sub> , т/т CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	1
Метан	21
NO <sub>2</sub>	310
Водяной пар	5

На рис.4 Приведены данные по образованию паров воды при сжигании ряда природных и искусственных топлив.

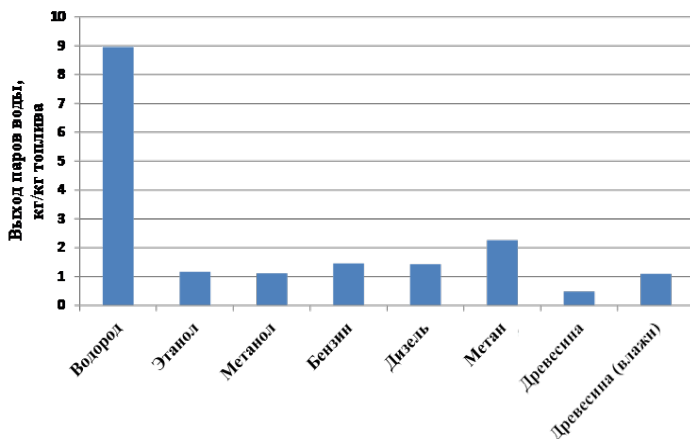


Рис.4. Образование паров воды при полном сжигании ряда природных и искусственных топлив

Очевидно, что даже такое топливо, как водород, являющийся надеждой на экологически чистую энергетику, вносит свой вклад в создание парникового эффекта.

## 1. Достижения и проблемы современных технологий производства электрической энергии

Следует констатировать, что грандиозные планы ученых по созданию в 20 веке принципиально новых энергетических источников, таких как управляемый термоядерный синтез, применение электрохимического преобразование химиче-

ской энергии топлива в электрический ток; преобразования тепловой энергии в электричество с КПД выше 50-60% с применением магнитогидродинамического метода – не были реализованы. Основной современной энергетики остаются технологии преобразования природных топлив в теплоту (сжигание органических топлив, деление урана) с последующим термодинамическим преобразованием теплоты в механическую, а затем электрическую формы. За прошедшее столетие данные технологии прошли большой путь эволюционного развития и достигли высокой надежности и технического совершенства [6].

### **1.1. Атомная энергетика**

Из освоенных технологий надежного и экологически безопасного производства энергии на сегодняшний день в лидеры уверенно выходит атомная энергетика, основанная на использовании атомных электростанций с ядерными реакторами на тепловых нейтронах с урановым топливом и легководным замедлителем-теплоносителем [7].

Обладая высоким энергетическим потенциалом, позволяющим обеспечить быстрое увеличение энергопроизводства, данная технология имеет и ряд ограничений [8]:

- ограниченный объем разведанных запасов урана (менее 10 млн. т);
- невозможность получения высоких термодинамических параметров теплоносителя (выше 360°C), вследствие использования в качестве материалов активных зон циркониевых сплавов (прозрачных для нейтронов тепловых энергий);
- низкий термодинамический и общий КПД (менее 35%);
- необходимость в большом количестве охлаждающей воды для организации термодинамического цикла;
- большой объемом паров воды, поступающих в атмосферу вследствие использования испарительных технологий охлаждения.

Имеющиеся в нашей стране фундаментальные достижения по созданию атомных электростанций с реакторами на быстрых нейтронах (БН 600, БН 800, Брест 300ОД, СВБР600) способны снять большую часть этих ограничений и, безусловно являются столбовой дорогой развития атомной энергетики в 21 веке [10]. Однако процесс измене-

ния структуры всей атомной отрасли длительный и весьма капиталоемкий.

### **1.2. Тепловая энергетика**

В настоящий период тепловые электростанции, использующие химическую энергию ископаемых топлив, обеспечивают свыше 80% мирового производства электрической энергии и, в ближайшие годы, их роль в энергообеспечении стран мира будет только увеличиваться (вследствие максимальных значений EROEI)[10]. Длительный эволюционный путь, пройденный этой технологией производства электрической энергии (от поршневых машин до паровых турбин на суперсверхкритических параметрах пара и комбинированных парогазовых установок) позволил достичь КПД выше 45-50% и существенно увеличил термодинамическую эффективность современных ТЭС [11].

В тоже время основной процесс тепловой энергетики – сжигание органического топлива с использованием атмосферного воздуха приводит к труднопреодолимым негативным экологическим последствиям [4,12]:

- поглощение огромного объема кислорода из атмосферы (более 10 кг/кг топлива);
- образование парникового газа CO<sub>2</sub> и паров воды, как продуктов окисления топлива;
- образование при высоких температурах горения окислов азота из атмосферного воздуха;
- образование отходов сгорания (зола, шлак) при использовании твердого топлива.

Решению этих проблем посвящены многочисленные исследования, позволяющие в разной мере снизить негативное влияние тепловой энергетики на биосферу – однако радикальные решения отсутствуют. Имеющиеся решения настолько резко повышают капиталоемкость, что ряд стран приняли решения об отказе от наиболее затратной угольной энергетики.

### **1.3. Возобновляемые источники энергии**

Возникновение и перенос энергии в природе – самый обильный и практически неисчерпаемый источник энергии, который человечество в той или иной мере использовало на всех этапах своего существования. Энергия водных потоков,

ветра, солнца, биомасс – способствовали освоению разделенных океанами частей планеты, защите от сурового климата, заменяла труд людей в разных сферах, включая металлургию. Человек освоил и уже применяет в широких масштабах энергию рек, создав мощные гидравлические электростанции, набирается положительный опыт использования других типов возобновляемых источников энергии. При разумном использовании возобновляемые источники энергии лишены практически всех ресурсных и экологических недостатков, свойственных традиционным тепловым и атомным электростанциям [13].

Специфической особенностью большинства возобновляемых источников энергии являются:

- переменность их интенсивности в годовом и суточном циклах, усугубляемая трудно прогнозируемым стохастическим характером изменения;
- низкая концентрация энергии большинства источников;
- неравномерность поступления в различные географические зоны.

Учет этих факторов и создание эффективных энергетических технологий претерпело в последние десятилетия большие положительные изменения, так эффективность использования энергии ветра приближается к теоретическому пределу (59%), КПД фотоэлектрических преобразователей достиг 20% (при использовании гетероструктурных полупроводников достигает 35-40%).

Успешно разрабатываются методы аккумуляции электрической энергии и промежуточных энергоносителей (водород, этанол, металлические топлива и пр.). Однако все инновационные решения, направленные на повышение надежности энергоснабжения приводят к снижению показателя общей экономической эффективности (EROEI), который у данного типа установок и без этого существенно ниже, чем у ТЭС и АЭС.

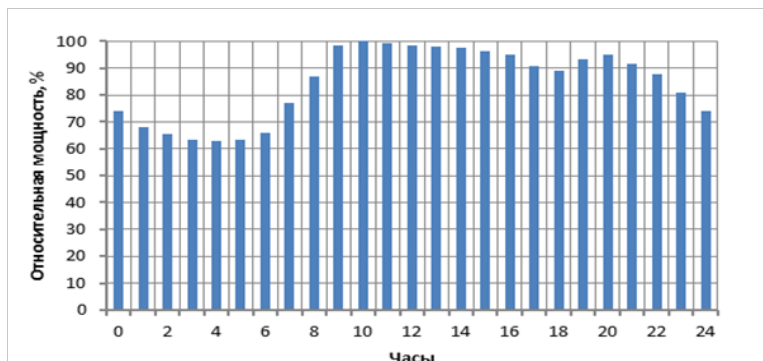
Тем не менее, экологические преимущества использования возобновляемых источников несомненны и стимулируют активное развитие работ по их использованию.

## **2. Потенциал повышения эффективности энергетического комплекса России**

### **2.1. Особенности потребления электрической энергии**



В зависимости от географических и климатических условий, образа жизни и степени развития и видов промышленности имеются значительные различия в потребностях стран в энергии в течение года и даже в суточных циклах потребления. Так в России годовой максимум энергопотребления приходится на декабрь-январь, а в Японии на июль-август. Страны с развитой промышленностью потребляют в этой сфере свыше 50-60% энергии, а другие страны менее 10-20%. Общей закономерностью для всех стран является то, что потребление энергии естественным образом связано с циклом активной жизнедеятельности человека, сформированной в ходе эволюции. Этот цикл полностью определяется приходом солнечной энергии на поверхность и определяет продолжительность светового дня и температурный режим территорий. Задачей энергетической отрасли является удовлетворение потребностей в энергии, имеющих переменный во времени характер. На рис.5 приведен суточный график электропотребления для промышленно развитого региона Российской Федерации [14].



*Рис.5 Характерный суточный график электропотребления для промышленно развитого региона Российской Федерации*

Щеклеин С. Е.

Несмотря на подавляющий вклад базовой нагрузки, имеет место значительный рост потребляемой мощности в дневные и вечерние часы. Регулирование производимой мощности практически всегда сопровождается потерей термодинамической и экономической эффективности генерации и передачи энергии.

## **2.2. Возможности повышения эффективности современных АЭС с реакторами легководными ядерными реакторами (ЛВР) путем неядерного перегрева пара**

Основу современной атомной энергетики составляют атомные электростанции с ядерными реакторами на тепловых нейтронах с урановым топливом и легководным замедлителем нейтронов (ЛВР) доля которых в мире превышает 85% [15].

Выбор современного давления в первом контуре реакторов ЛВР большой мощности (15,7 МПа) связан с ограничением по температуре, равным 350°C для оболочек твэлов из циркониевых сплавов. Отсюда следует, что предельная температура пара во втором контуре не может превысить 315°C в случае его перегрева.

Таким образом, выбор циркониевого сплава для оболочек твэлов и повышение единичной мощности блоков практически предопределили термодинамические параметры АЭС с ЛВР: давление первого контура около 16 МПа, температура теплоносителя на выходе из реактора 320 – 330°C; давление и температура пара во втором контуре соответственно 6,3 – 7,2 МПа и 279 – 285°C.

Высокая мощность турбоустановок достигается большими расходами пара, что влияет на потери тепловой энергии в конденсаторе паровой турбины. Повышенные невосполнимые тепловые потери в холодном источнике снижают экономичность работы таких энергоблоков, поэтому КПД брутто современных атомных электростанций с ЛВР, как правило, не превышает 32 – 35 % [8].

Среди путей повышения энергоэффективности АЭС с ЛВР рассматривается вариант первичного перегрева пара. Однако этот способ повышения КПД цикла, успешно использованный на реакторах канального типа АМБ 100 и АМБ 200, не получил дальнейшего развития, главным образом, из-за необходимости применять для активной зоны реакторов высокотемпературные стали, снижающие эффективность использования уранового топлива.

Опыт применения огнечного перегрева пара на АЭС «Индиан-Пойнт» (США) не принес ожидаемых результатов вследствие термодинамической неэффективности использования перегретого пара низкого давления (2,6 МПа) [16].

Известно [17], что максимальная термодинамическая эффективность паросиловых циклов достигается при одновременном повышении начальной температуры и начального давления пара. Наибольшая эффективность достигается при сопряженных параметрах пара (табл. 2).

Таблица 2. Сопряженные параметры пара (при конечной влажности пара в турбине 13% и внутреннем относительным КПД турбины 85%)

Температура, оС	700	650	600	570	540	515	480	450	410
Давление, МПа	30	25	20	18	14	12	9	7	5

Современный уровень развития энергетического машиностроения, широкое применение в тепловой энергетике парогазовых циклов, создание эффективных высокотемпературных газовых турбин и паровых компрессоров позволяют рассматривать возможность достижения высоких сопряженных параметров пара на АЭС с традиционными ЛВР без превышения допустимых условий эксплуатации активных зон с оболочками ТВЭЛов из циркониевых сплавов путем компрессии и перегрева насыщенного пара газовым топливом [18,19].

Компрессия и «огневой» перегрев позволят получить критические и суперсверхкритические параметры пара на АЭС с легко-водным реактором, что позволит использовать все достижения энергомашиностроения «тепловой» энергетики в атомной промышленности.

На рис.6 а, б. приведены результаты расчетов вариантов тепловых схем АЭС с дополнительным огневым перегревом пара, параметры которого (на выходе из парогенератора АЭС) совпадают с начальными параметрами турбоустановки К-1200-6,8/50, применяемой в проекте АЭС с реактором ВВЭР-1200 [19].

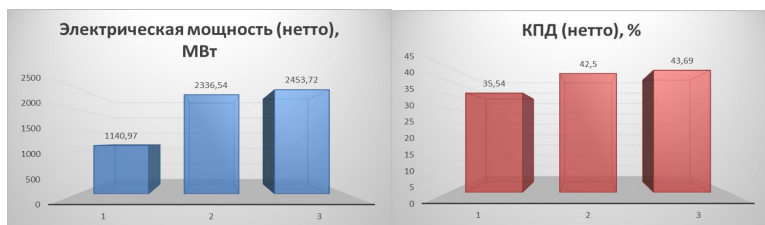
Рассмотрены варианты:

1. АЭС с циклом насыщенного пара турбоустановки К-1200-6,8/50,

2. АЭС с начальным перегревом пара без дополнительной компрессии до температуры 650оС и промежуточным

перегревом пара при разделительном давлении 1,4 МПа до температуры 550оС,

3. АЭС с компрессией пара до давления 30 МПа и начальным перегревом пара до температуры 650оС, а также двумя промежуточными перегревами пара (при давлениях 9 МПа и 3,5 МПа до температур 650оС).



*Рис. 6. Электрическая мощность (а) и КПД (б) циклов (нетто). 1-цикл насыщенного пара турбоустановки К-1200-6,8/50; 2-цикл с начальным и одним промежуточным перегревом пара; 3-цикл с компрессией, начальными двумя промежуточными перегревами пара*

Перевод паротурбинной части АЭС на сверхвысокие параметры путем огневого перегрева, как с дополнительной компрессией, так и без неё приводит практически двукратному повышению мощности АЭС и существенному повышению КПД.

При проектировании АЭС, работающей по циклам перегретого пара, здание реактора останется практически без изменений (по проекту ВВЭР-1200). Изменения коснутся только здания турбины.

При реализации циклов 2 и 3 сохранится преобладающая роль ядерного энерго источника, т.к. получение исходного насыщенного пара является наиболее энергоемким термодинамическим процессом. На рис. 7а,б. показано распределение теплоты, подводимой в циклах с «огневым» перегревом и с дополнительной компрессией.

Повышение энергетической эффективности выражается также в снижении удельного расхода газового топлива на производство электрической энергии (по сравнению ТЭС) на 25-30%, уменьшении выбросов продуктов сгорания в 2,5 раза, уменьшении потребления технической воды (по сравнению сАЭС) в 1,5 раза.



Рис.7. Распределение теплоты, подводимой в цикле с «огневым» перегревом (а) и в цикле с компрессией и «огневым» перегревом(б)

### 2.3. Возможности эффективной интеграции ВИЭ в энергообеспечение России

В следствии географического положения значительная часть территории нашей страны является крайне энергоемкой (потребности в отоплении, освещении и пр.), однако в силуэ-тих же причин располагает огромным потенциалом возобнов-ляемых источников энергии. Населенная часть территории располагается, в основном, в зоне резкоконтинентального климата, характеризующейся холодной и продолжительной зимой и более коротким, но достаточно теплым летом. Суще-ствующие энергоисточники и энергетические системы распо-лагаются в зонах концентрации населения.

Естественным путем быстрого освоения потенциала ВИЭ в нашей стране могло бы явиться дополнение существующих и проектируемых ТЭС и АЭС установками солнечной энергетики. Приведенный выше на рис. 5 суточный график изменения энергопотребления ясно показывает наличие «пикового» дневного увеличения энергопотребления, значи-тельная часть которого могла бы обеспечиваться солнечной генерацией. На рис.8. представлен месячный график прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность для Уральского региона в летние месяцы [20].

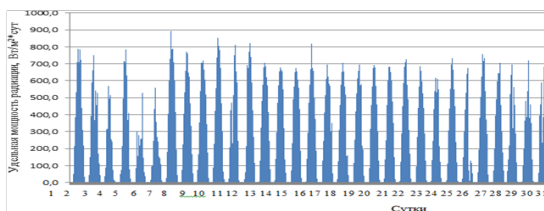


Рис.8. Удельная мощность поступления солнечной радиации для летнего месяца (июль)

Из графика видно, что в ночные часы приход энергии отсутствует, но имеет максимальные значения в дневные «пиковые» периоды.

Этот эффект позволяет уменьшить нагрузки по покрытию неравномерностей «пикового» энергопотребления с помощью только теплоэнергетической генерации.

Мощность дополнительной солнечной генерации может соответствовать величине «пиковых» нагрузок на соответствующей территории. По данным [5] это позволит снизить расход топлива в летний период до 25%, а в среднем по году от 10 до 20%, что пропорционально снизит антропогенную нагрузку.

Опыт создания гибридных солнечно–тепловых электростанций появляется в ряде стран мира, в т.ч. в России успешно работает совместно с Сакмарской ТЭЦ солнечная электростанция мощностью 40 МВт (рис.9), использующая Российское оборудование и информационно-управляющие программные комплексы [21].



*Рис.9. Орская (Сакмарская) СЭС*

Производство энергии Сакмарской СЭС по месяцам года показано на рис.10 [22].

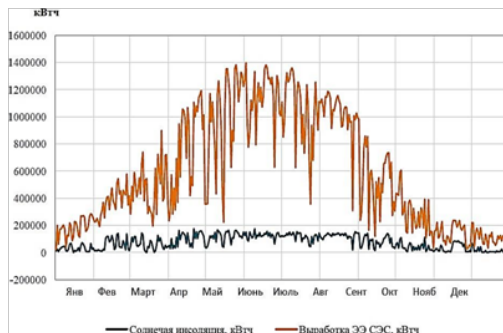


Рис.10. Производство энергии Сакмарской СЭС по месяцам года

### 3. Облик экологически толерантной электростанции ближайшего будущего

#### 3.1. Энергетика и природа

В современной энергетике нашли практическое использование три основных технологии производства электрической энергии – тепловая и атомная энергетика с ЛВР, возобновляемые источники энергии различных типов (гидроэнергетика, солнечная и ветровая энергетика, геотермальная энергетика и пр.). Каждое из этих направлений энергетике имеет свои преимущества и недостатки, как с точки зрения возможных масштабов производства энергии, так и с точки зрения экономичности и влияния на экологию [23]. В общем виде схема энергетического взаимодействия человека и природы приведена на рис.11.

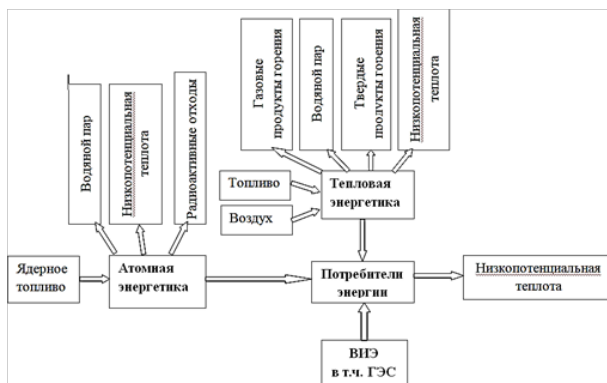


Рис.11. Схема источников и отходов энергетического производства.

Очевидно, что все энергетическое производство основано на использовании природного потенциала накопленного планетой (ТЭС, АЭС) либо получаемого в настоящее время (ВИЭ). Использование накопленных топлив неизбежно приводит к воздействию на биосферу и газовую оболочку Земли.

Задача современной энергетики состоит в том, чтобы обеспечивая необходимый и увеличивающийся рост энергопотребления максимально снизить экологическое воздействие энергетического производства с использованием существующих технологий – т.е. создать в ближайшем будущем экологически толерантную энергетику.

### 3.2. Концепция экологически толерантной электростанции

Как следует из раздела 2, современные энергетические технологии способны обеспечить кратное снижение антропогенной нагрузки при совместном использовании достижений всех ветвей тепловой, атомной и возобновляемой энергетики. На рис.11 приведена принципиальная схема такого энергетического комплекса, каждый из элементов которого уже освоен энергетиками разных направлений.

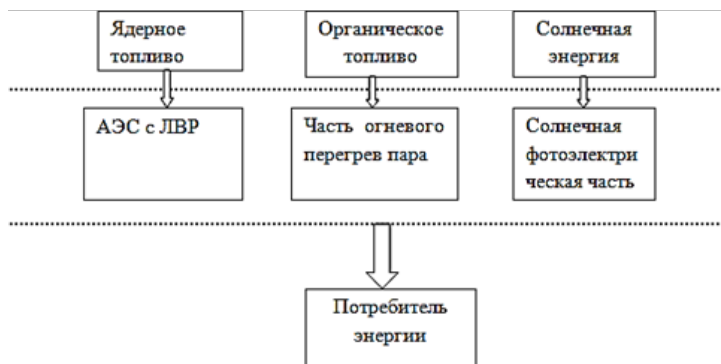


Рис.12. Концепция атомно-теплого комплекса с покрытием пикового энергопотребления солнечной генерацией

Повышение капитальных затрат на реализацию данного комплекса компенсируется снижением потребления органического топлива и углеродного следа в продукции–электрической энергии. На рис.12. показана атомно-солнечная электростанция [24].





*Рис. 12. Атомно-солнечная электростанция.*

### **Заключение**

1. Повышение энергообеспечения человека позволяет ему противостоять стихиям, развивать науку, культуру, технику; улучшать качество и длительность жизни. В ряде стран достигнута средняя продолжительность жизни свыше 80 лет.

2. Создание благоприятных для человека условий жизни на Земле приводит к резкому росту числа людей. Сейчас население Земли составляет свыше 7 млрд. чел. Уже к 2100 г. оно составит 13 млрд. человек, что приведет к росту потребностей в энергии до 50-70 млрд.т.у.т/год [1].

3. Энергетическое обеспечение регионов мира отличается в десятки раз, а стран мира – в сотни раз. Менее 10% населения планеты имеют достаточный уровень энергообеспечения и продолжительность жизни свыше 70 лет. Странами мира предпринимаются энергичные шаги по достижению уровня жизни и энергообеспечения наиболее развитых стран.

4. Реальный путь снижения, связанной с этим эмиссии CO<sub>2</sub> и преодоления энергетического дефицита- энергосбережение, развитие атомной энергетики; создание конкурентоспособных возобновляемых источников энергии.

5. Достижения современной атомной, тепловой и возобновляемой энергетики ставят задачу их совместного использования для достижения минимальных расходов топлива и водных ресурсов. Включение в структуру ЭС солнечной

электростанции позволяют максимально использовать дневной приход солнечной энергии для покрытия дневного максимума энергопотребления.

### Список использованных источников

1. Капица С. П. Общая теория роста человечества: Сколько людей жило, живёт и будет жить на Земле М.: УРСС, 2009. 134 с.
2. Vaclav Smil and BP Statistical Review of World Energy Смил В. Энергия и цивилизация / «Эксмо», 2017 375 с.
3. BP Statistical Review of World Energy 2020// <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
4. В.И.Данилов-Данилян, К.С.Лосев Экологический вызов и устойчивое развитие// «Прогресс-Традиция», М.,2000. 379 с.
5. Основы экологии: Учебное пособие / А.В. Островская, Г.П. Ясников, В.И. Лобанов, С.Е. Щеклеин. 2-е изд. испр. и дополн. – Екатеринбург: УГТУ, 1999.
6. Фаворский О.Н. «Развитие энергетики России в ближайшие 20-30 лет». Теплоэнергетика №2, 2008, С. 2-3
7. Асмолов В.Г., Семченков Ю.М., Сидоренко В.А. Облик АЭС с легководными энергетическими реакторами следующего поколения // VII Международная научно\_техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – М.: 2010, С.3-14.
8. Щепетина Т.Д. О повышении КПД энергоблоков с водо\_водяными реакторами (ВВР)//Энергия: экономика, техника, экология. 2010. №12. С.21-29
9. Асмолов В.Г. «Выбор приоритетов и оптимальной стратегии развития атомной энергетики России», Теплоэнергетика, №5, 2009, С.2-6
10. Gupta A.K., Hall C.A.S. A Review of the Past and Current State of EROI Data// Sustainability. 2011. V.3, n. 10. P. 1796- 1809.
11. Eisner W., Kowalczyk L., Niegodajew P., Drobnik S. Thermodynamic analysis of a thermal cycle of supercritical power plant // Proceedings of «International symposium Symkom 2011: Compressor and turbine flow systems, theory and application areas», Poland, Lodz, 2011, pp. 217-225

- 12.Щеклеин С.Е. Человек, энергия, природа. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 59 с.
- 13.Попель О.С.,Фортов В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. Учебное пособие//2018 : М. 450 с.
- 14.[14] Воропай Н.И.,Стычински З.А., Козлова Е.В., Степанов В.С., Суслов К.В. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей // Известия РАН, Энергетика, 2014, №1, с.84-90.
- 15.Nuclear power reactors in the world// International Atomic Energy Agency(IAEA). Series No.2,Vienna 2020
- 16.Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Дубинин А.М. Повышение энергоэффективности АЭС// Известия вузов. Ядерная энергетика 2015. №4. С.15-25
- 17.Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008
- 18.Super powerful steam superheaters and turbines for hybrid nuclear power plants / Zaryankin A.E., Lyskov M.G., Arianov S.V., Rogalev A.N. // Journal of Power Technologies. 2011. №12. pp. 191-197
- 19.Трухний А. Д., Костюк А. Г., Трояновский Б. М. Пути совершенствования отечественных паротурбинных установок и целесообразность создания пилотного энергоблока на сверхвысокие параметры пара // Теплоэнергетика. 1997. № 1. С. 2–8
- 20.Бабенко И.А., Шульман В.Л. Технологии суперсверхкритических параметров пара в современной энергетике//Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых УрФУ. 2018. С. 69-71.
- 21.Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Попов А.И., Велькин В.И., Коржавин С.А., Алхарбави Н.Т.А. Цифровые технологии при изучении студентами источников возобновляемой энергии//Первая Международная научная конференция по проблемам цифровизации: EDCRUNCH URAL – 2020. УрФУ. 2020. С. 406-418.
- 22.Ассоциация «НП Совет рынка» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.np-sr.ru/index.htm>.
- 23.IEA [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/renewable-power>
- 24.Атомная энергия [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/01/10/100555>